

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника,
Профиль 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы
Инженерная школа энергетики
Отделение электроэнергетики и электротехники

**Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
Совершенствование методов определения допустимой токовой нагрузки электросетевого оборудования для задач планирования режимов и развития электроэнергетических систем

УДК 621.311.15/.16.002.5.004

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A5-42	Даминов Ильдар Болатович		

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующая отделом аспирантуры и докторантуры	Барская Анна Валерьевна	к.т.н., доцент		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Ивашутенко Александр Сергеевич	к.т.н., доцент		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Прохоров Антон Викторович	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и постановка проблемы исследования. Снижение стоимости производства электроэнергии является одной из главных целей функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС). В крупных энергосистемах данная цель достигается за счет оптимального распределения нагрузки между экономически наиболее эффективными генераторами. За рубежом данная процедура получила название economic dispatch (ED). Прибыль системного оператора от инвестиций в технологии, позволяющие улучшить решение задачи ED, может превышать свои затраты в 10 – 1000 раз. Это объясняется тем, что улучшение решения задачи ED лишь на несколько процентов позволяет значительно снизить стоимость производимой электроэнергии. Например, Министерство энергетики США в своем докладе для конгресса отмечает, что использование ED позволило снизить стоимость производимой электроэнергии в стране на 4 %. В результате чего, чистый дисконтированный доход т.е. экономия за счет снижения стоимости электроэнергии составила 41 миллиард долларов в течение 20 лет.

Одним из способов, позволяющих улучшить решение задачи ED, является увеличение пропускной способности элементов электрической сети. В данной работе в качестве такого сетевого элемента рассматриваются силовые маслонаполненные трансформаторы. В отличие от прочих сетевых элементов, маслонаполненные трансформаторы имеют значительную нагрузочную (перегрузочную) способность, которая позволяет длительное время эксплуатировать трансформатор выше своей номинальной мощности. Поэтому за счет правильного использования нагрузочной (перегрузочной) способности трансформатора можно как минимум увеличить его пропускную способность, а как максимум общую пропускную способность электрической сети, в которой трансформатор может быть ограничивающим элементом. Однако, несмотря на имеющийся потенциал применения нагрузочной (перегрузочной) способности силовых трансформаторов, возможность ее использования для улучшения решения задачи ED до сих пор недостаточно исследована.

Таким образом, актуальность задачи снижения стоимости производства электроэнергии позволяет сформулировать **проблему** исследования, которая заключается в максимально полном использовании нагрузочной способности силовых трансформаторов для улучшения решения задачи ED. Необходимость теоретического и практического решения данной проблемы обусловила выбор **темы исследования**: «Совершенствование методов определения допустимой токовой нагрузки электросетевого оборудования для задач планирования режимов и развития электроэнергетических систем».

Объектом исследования является задача ED – задача наивыгоднейшего распределения нагрузки между генераторами при планировании и ведении режима.

Предметом исследования является задача совершенствования способов определения допустимой загрузки силовых трансформаторов.

Цель работы состоит в совершенствовании методов определения допустимой загрузки (термического предела) силовых маслонаполненных трансформаторов для улучшения результатов планирования режимов электроэнергетических систем.

В соответствии с целью, объектом и предметом исследования определены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть факторы, влияющие на допустимую загрузку трансформатора и выбрать те, которые будут учитываться в данной работе.
2. Разработать алгоритмы определения допустимых загрузок силовых трансформаторов для эффективного использования их нагрузочной способности при решении задачи ED на этапе планирования и ведения режима работы ЭЭС.
3. Модифицировать алгоритм решения задачи ED для обеспечения его интеграции с, разработанными алгоритмами определения допустимых загрузок силовых трансформаторов, а также оценить эффект от использования предлагаемых алгоритмов на примере тестовой схемы IEEE.

4. Оценить потенциал увеличения допустимых нагрузок маслonaполненных силовых трансформаторов относительно климатических условий на примере отдельных географических районов.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач использовались: фундаментальные положения теории трансформаторов, а именно тепловая модель согласно стандарту IEC 60076-7 2018, методы решения нелинейных динамических задач оптимизации, методы расчета режимов – AC –DC power flow, методы теории автоматического управления на основе прогнозирующих моделей (receding horizon control), а также методы математического моделирования. Аппробация разработанных алгоритмов выполнена на 14 узловой тестовой схеме, рекомендованной IEEE. При проведении исследований использовались следующие пакеты программ: MATLAB, CPLEX, Rastrwin.

Теоретической базой исследования являются фундаментальные труды отечественных и зарубежных специалистов по следующим тематикам:

наивыгоднейшее распределение нагрузки между генераторами (Арзамасцев Д.А., Бартоломей П.И., Холян А.М., Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Т.А., Горнштейн В.М., Обрезков В.И., Маркович И.М., Цветков Е.В., Алябышева Т.М., Парфенов Л.Г., J. Zhu, A.J. Wood, B.F. Wollenberg, G.B. Sheble и др.);

факторы, определяющие допустимую нагрузку трансформатора (Широков О.Г., Зализный Д.И., Лось Д.М., Raymond T.C., Pasricha A., Crow M.L., Aragao, F.A.P., Bochenski B., Mosinski F., Piotrowski T., Jalal T.S., X. Zhou, Li X., Mamizadeh A., Iskender I., Savaghebi M., Jalilian A., Gholami A., Elders I., Yang J., Strickland D., Villarroel R., Liu Q., Wang Z., Shahbazi B., Weekes T., Molinski T., Swift G., Sen P.K.S., Gao M., Radakovic Z.R., Sorgic M.S., Saha T.K., Purkait P., Lelekakis N., Martin D., Wijaya J., Djamali M., Tenbohlen S., Schlabbach J., Degefa M.Z., Godina R., Cipcigan L.M., Taylor P.C., L.M. Cipcighariati M., Tee S.J., Chacon-Troya D.P., Lata J.P., Medina R.D. и др.);

способы определения допустимой токовой нагрузки трансформатора (Фурсанов, М. Дуль И., Чернов И., Голубов А., Конюхова Е., Анищенко В.А., Иванов В.В., Гороховик И., Андриенко П., Конограй С., Поляков М., Татевосян А., Плеханова В., Грачева Е., Наумов О., Федотов Е., Адамевич В., Казанский С., Моссаковский В., Печенкин Д., Шишкин И., Raymond T.C., Pasricha A., Bochenski B., Aragao F.A.P., Jalal T.S., Xiang Zhou, Li X., Mamizadeh A., Savaghebi M., Elders I., Yang J., Villarroel R., Shahbazi B., Weekes T., Sbravati A., Jardini J.A., Harrison D., Reid G.F., O'Grady J., Chang-Ho Park, Perez J., Norris E.T., Lloyd G., Liu W.J., Humayun M., Godina R., El-Gasseir M.M., El-Bayeh C.Z., Dong M., Djamali M., Craghead D.O., Sealey W.C., Buslavets O., Bracale A., Blake J.H., Biçen Y., Lahoti B., Wong C.C., Kartas A., Sen P.K., Tenbohlen S., Elmakis D., Swift G.W., Rajender K., Pudlo G., Pierce L.W., Moses P.S., Montsinger V.M., Shiljkut V.M., Li M., Lee C.Y., Lachman M.F., Josue F., Ippolito L., Haque A.N., Durian S., Douglass D.A., Degefa M.Z., Chen L., Ben-Yaacov G., Chenier R., Nguyen T.T., Yasuoka J., Feng X., Sousa J.C.S., Li L., Satarworn S., Xin Li, Hu G., Huang Y., Porumb R., Zhang Y., и др.);

тепловые модели трансформаторов (Swift, G., Molinski, T.S., Bray, R., Leisture, B.C., Hagman, W.H., Kirtley, J.L.Jr., Susa, D., Lehtonen, M., Nordman, H., Palola, J., Lindsay, J.F., Kalic, D., Radakovic, Z., Lazarevic, Z., Tang, W.H., Wu, Q.H., Richardson, Z.J., Feser, K., Jacic, D., Lukic, J., Alegi, G.L., Black, W.Z., Maksimovic, S., Degefa, M., Millar, R.J., Lehtonen, M., Lockie, A.M., Whirlow, D.K., Whirlow, D.K., Sandraz, J.P.A., de Leon, F., Cultrera, J. и др.);

учет динамического характера пропускной способности сетевого оборудования в задачи ED (Cheung K.W., Jun Wu., Nick M., Cao J., Du W., Wang H.F., Pinard M.A., Xu B., Ulbig A., Andersson G., Wang Y., Mengxia Wang, Banakar H., Alguacil N., Galiana F.D., Jinxin Huang, Xueshan Han., Shu J., Guan R., Wu L., Haicheng Zhang, Bucher M.A., Vrakopoulou M., Yanfei Chen, Banerjee B., Jayaweera D., Islam S.M., Song C., Chu X., Dabbaghjamesh M., Kavousi-Fard A., Mehraeen S., Pytlak P., Musilek P., Doucet J. и др.);

Научная новизна заключается в следующем:

1. Показано, что для определения оптимального графика допустимых нагрузок трансформатора в течение операционных суток необходимо решить отдельную оптимизационную задачу. В связи с этим впервые для данной оптимизационной задачи предложена целевая функция, заключающаяся в максимальном отпуске электроэнергии через трансформатор. Доказано, что применение предлагаемой целевой функции позволяет наиболее эффективно использовать нагрузочную способность силовых трансформаторов и улучшить решение задачи ED;
2. На основе предложенной целевой функции разработаны алгоритмы определения допустимых нагрузок силовых трансформаторов, обеспечивающие эффективное использование их нагрузочной способности на этапе планирования режима. Доказана и показана их эффективность относительно традиционных методов, используемых в современной практике планирования режимов в РФ;
3. Разработан метод на основе управления с прогнозирующими моделям (receding horizon control, RHC), позволяющий на этапе ведения режима актуализировать график допустимых нагрузок трансформатора с учетом любых отклонений от прогнозных условий (нагрузки, температуры наружного воздуха) в течение операционных суток. Доказано, что ежечасная актуализация допустимых нагрузок трансформатора на основе RHC позволяет обеспечить дополнительное улучшение решения задачи ED на этапе ведения режима.
4. Предложена модификация алгоритма решения задачи ED для интеграции в нее разработанных алгоритмов определения допустимых нагрузок силовых трансформаторов. Доказана и показана эффективность модифицированного алгоритма в сравнении с традиционным алгоритмом решения задачи ED.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке алгоритмов эффективного использования нагрузочной способности силовых трансформаторов с целью повышения экономичности режима работы ЭЭС, а также в модификации процедуры решения задачи ED для интеграции разработанных алгоритмов.

Практическая значимость исследования заключается в

1. Разработке алгоритмов определения допустимых нагрузок трансформатора обеспечивающие максимум отпуска электроэнергии и их программная реализация в виде скриптов, функций в среде MATLAB.
2. Разработке программного модуля с человеко-машинным интерфейсом, для расчета допустимых нагрузок трансформатора автономно, то есть без привязки к MATLAB, а также с возможностью совместной работы с другими программными комплексами RastrWin и IBM CPLEX.

Положения, выносимые на защиту:

1. Доказано, что для определения оптимального графика допустимых нагрузок трансформатора в течение операционных суток, необходимо решить отдельную оптимизационную задачу. Наиболее эффективной целевой функцией данной оптимизационной задачи является максимальный отпуск электроэнергии через трансформатор.
2. Разработанные алгоритмы определения допустимых нагрузок трансформатора, позволяющие максимизировать отпуск электроэнергии в задачах планирования режима работы ЭЭС.
3. Разработанный алгоритм определения допустимых нагрузок трансформатора на базе метода RHC как средство для ежечасной актуализации термического предела при ведении режима внутри операционных суток.
4. Предложенная модификация алгоритма решения задачи ED для интеграции разработанных алгоритмов определения допустимых нагрузок силовых трансформаторов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечены использованием совокупности научных подходов; правильным сочетанием теоретических и эмпирических методов;

Личное участие автора заключается в разработке, обосновании и реализации поисковой и экспериментальной деятельности по подготовке методологической основы краткосрочного планирования режимов энергосистемы с учетом динамического характера термического предела при решении задачи оптимального распределения нагрузки в энергосистеме. Также личное участие автора заключается в апробации результатов исследования, обработке и интерпретации экспериментальных данных; в подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура диссертационного исследования состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 277 наименований. Научно-квалификационная работа иллюстрирована рисунками, таблицами и диаграммами.